第42卷 第1期
2025年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 1
Jan. 2025

甘肃省内陆河流域水资源承载能力

李常亮[1]， 雒天峰[1]， 康燕霞[2]

（1. 甘肃省水利厅水利工程建设造价与规费管理中心，甘肃 兰州 730030；2. 甘肃农业大学，甘肃 兰州 730070）

摘 要：甘肃省内陆河流域作为丝绸之路的重要通道，水资源承载能力是影响当地社会经济可持续发展的重要因素。通过构建“水资源-社会-经济-生态”评价指标体系，基于CRITIC法和熵权法确定评价指标综合权重，利用TOPSIS模型、耦合协调度模型和障碍度函数模型，开展甘肃省内陆河流域水资源承载能力评价，分析各子系统耦合协调状况及影响水资源承载能力水平的主要障碍因素。结果表明：2011—2022年甘肃省内陆河流域酒泉、嘉峪关、张掖、金昌、武威5市水资源承载能力的水资源子系统和社会子系统的发展水平滞后于经济子系统和生态子系统。同时，甘肃省内陆河流域水资源承载能力水平总体上呈缓慢增加趋势，由短缺状态逐步转换至合理状态。从2011—2022年相对接近度均值来看，酒泉、金昌、张掖水资源承载能力等级处于短缺状态，嘉峪关、武威水资源承载能力等级处于合理状态。5市4个子系统间耦合协调性均处于初级协调阶段，提高水资源子系统、社会子系统的水资源承载能力是提升甘肃省内陆河流域水资源综合承载能力的关键所在。耕地率、生态用水占比、人口密度以及废水中化学需氧量排放量4项指标为主要障碍指标。

关键词：水资源承载能力；TOPSIS；耦合协调；障碍度；甘肃

开展水资源承载能力评价对平衡水资源利用与经济发展的关系具有重要意义[1-2]。甘肃省河西内陆河流域是中国西北的重要生态廊道，流域内水资源开发利用程度高[3]。如何解决流域内经济发展、生态保护与水资源开发利用的矛盾，已成为影响流域可持续发展的关键问题。为此，开展甘肃省内陆河流域水资源承载能力评价，根据评价结果统筹布局流域内城、地、人、产，实现流域水资源持续健康向好发展具有重要现实意义。

水资源承载能力指区域水资源对当地社会经济和生态环境发展的支撑能力。国外对水资源的研究，主要在水资源管理方面[4-5]，国外很少有学者专门研究水资源承载能力，只有在进行区域可持续发展研究时，涉及对水资源承载能力的分析[6]。国内学者对水资源承载能力的研究起步于上个世纪80年代，主要针对流域、地区和城市开展研究。对于甘肃省河西走廊地区，已有研究对酒泉市、武威市的水资源承载能力进行了评价[7-8]，缺少对整个甘肃省河西内陆河流域水资源承载能力评价研究。近年来，针对水资源承载能力评价，国内学者利用不同的研究方法开展了大量研究工作。黄博等[9]基于水资源、生态环境、经济、社会4个角度构建评价指标体系，利用熵权法、AHP法和CRITIC法综合赋权确定指标权重，基于TOPSIS模型进行武威市水资源承载能力评价。谭豪等[10]基于CRITIC-VIKOR法对云南省水资源承载能力进行了综合评价，表明经济社会子系统水资源承载能力最稳定且有明显提升空间。刘庆芳等[11]基于压力-状态-响应模型，开展西藏自治区水资源承载能力评价，并采用耦合协调模型分析水资源承载能力子系统间的耦合协调关系。唐家凯等[12]利用障碍度函数分析发现人均水资源量、水资源开发程度是制约黄河流域水资源承载力提升的主要障碍因素。

甘肃省内陆河流域包括酒泉、嘉峪关、张掖、金

收稿日期：2024-02-27； **修订日期**：2024-04-22
基金项目：甘肃省重点研发计划项目（23YFFA0020）
作者简介：李常亮（1984-），男，硕士，主要从事水利规划、水资源配置研究. E-mail: 158908312@qq.com
通讯作者：雒天峰. E-mail: 147173595@qq.com

昌、武威5市，干旱少雨、蒸发强烈、生态脆弱、水资源短缺是流域的基本特点[13]。近年来，国家耕地保护、粮食安全、群众增收、生态安全等政策对水资源承载能力提出更高要求[14]。基于此，本文借鉴国内外学者关于水资源承载能力评价的基本思想、基本方法，构建"水资源-社会-经济-生态"水资源承载能力评价指标体系，选用CRITIC法和熵权法两种客观赋权方法来确定评价指标综合权重，利用TOPSIS模型、耦合协调度模型和障碍度函数模型，评估甘肃省内陆河流域水资源承载能力，揭示主要障碍因素并提供合理的水资源管理策略。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

甘肃省内陆河流域包括河西走廊地区的酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市、武威市5个城市(图1)。流域内降水稀少，蒸发量大，气候干旱，形成荒漠、沙丘与绿洲并存的景观格局[15]。祁连山山脉是主要水资源涵养区，因山势分割为石羊河、黑河和疏勒河3个水系。3大水系多年平均水资源总量为53.83×10^8 m^3，水资源开发利用程度已超过100%。2020年甘肃省内陆河流域总用水量72.22×10^8 m^3，其中农田灌溉用水量54.64×10^8 m^3，占总用水量的75%，农业用水严重占用生态用水，也影响到城市及工业用水，制约着经济社会高质量发展[16]。

1.2 数据来源

评价指标基础数据源自相关政府部门发布的2011—2022年甘肃统计年鉴和水资源公报，分为两大类：一类是经济和人口数据，包括人口数量、国内生产总值(GDP)、工业增加值、废水中化学需氧量排放量、废水中氨氮排放量等，来自甘肃统计年鉴；另一类是具体的水资源数据，包括耕地面积、实际灌溉面积、水资源总量、供水量、农田灌溉用水量、林牧渔畜用水量、工业用水量、生态用水量等，数据收集自甘肃省水资源公报。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系构建 水资源承载能力评价指标体系包括目标层、准则层和指标层(表1)。参考已有研究方法[9-10]，将水资源子系统评价指标设置为人均水资源量、产水模数、供水模数、水资源开发利用率4个指标，指标间关联度较小，可避免冗余指标；社会子系统评价指标包括人口密度、耕地率、耕地灌溉率3个指标，主要考虑到农业和居民生活因素；经济子系统评价指标包括农业用水占比、万元工业增加值用水量、万元GDP用水量3个指标，从农业和工业两方面评价水资源承载力的经济性；生态子系统包括生态用水占比、废水中化学需氧量排放量、废水中氨氮排放量3个指标，表征生态环境保护对水资源承载能力的要求。正向指标值越高，表示水资源承载能力越强；逆向指标值越高，表示水资源承载能力越弱。

1.3.2 计算原理与方法

(1) CRITIC法

CRITIC法是一种客观赋权法，利用对比强度和

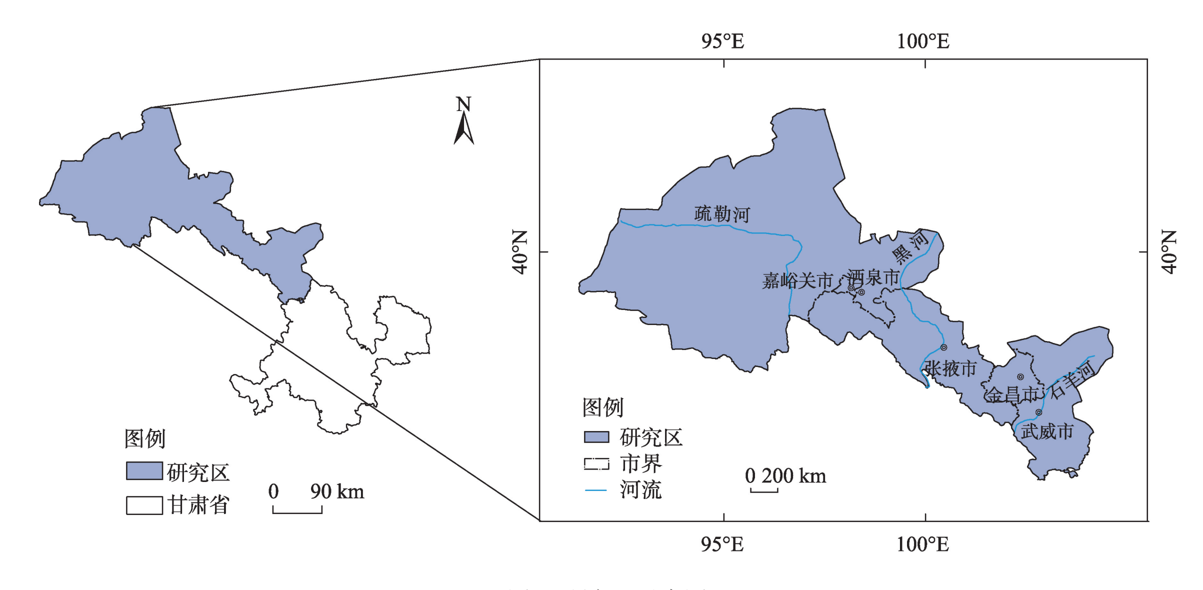


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch of the study

表1　甘肃省内陆河流域水资源承载能力评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of water resources carrying capacity of inland river basin in Gansu Province

目标层	准则层	指标层	属性
水资源承载能力	水资源子系统	人均水资源量/(m^3·人$^{-1}$)	正向
		产水模数/(10^4 m^3·km^{-2})	正向
		供水模数/(10^4 m^3·km^{-2})	逆向
		水资源开发利用率/%	逆向
	社会子系统	人口密度/(人·km^{-2})	逆向
		耕地率/%	逆向
		耕地灌溉率/%	逆向
	经济子系统	农业用水占比/%	逆向
		万元工业增加值用水量/[m^3·(10^4元)$^{-1}$]	逆向
		万元GDP用水量/[m^3·(10^4元)$^{-1}$]	逆向
	生态子系统	生态用水占比/%	正向
		废水中化学需氧量排放量/(10^4 t·a^{-1})	逆向
		废水中氨氮排放量/(10^4 t·a^{-1})	逆向

冲突性确定指标权重，其中对比强度依据指标数据的标准差表示，冲突性依据指标间的相关系数表示。指标数据标准差越大、指标间的相关系数越小，指标的权重越大[17]。具体计算过程如下，分别计算第i个评价指标的信息量e_i、权重w_{ci}。

$$e_i = \sigma_i \sum_{j=1}^{n} \left(1 - r_{ij}\right) \quad (1)$$

$$w_{ci} = e_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} e_i \quad (2)$$

式中：σ_i为第i个评价指标数据的标准差；r_{ij}为第i项、j项评价指标的相关系数。

（2）熵权法

熵权法也是一种客观赋权法，依据数据的离散程度来确定权重，数据越离散，权重越大[18]。对评价指标数据进行归一化处理，公式如下：

$$d_{ij} = \left(x_{ij} - x_{ij(\min)}\right) \Big/ \left(x_{ij(\max)} - x_{ij(\min)}\right) \text{（正向指标）} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \left(x_{ij(\max)} - x_{ij}\right) \Big/ \left(x_{ij(\max)} - x_{ij(\min)}\right) \text{（逆向指标）} \quad (4)$$

式中：d_{ij}表示第i项指标第j年归一化后的值，x_{ij}表示指标原始值。

分别计算评价指标比重p_{ij}、信息熵e_i、冗余值f_i和熵权w_{si}。

$$p_{ij} = d_{ij} \Big/ \sum_{j=1}^{m} d_{ij} \quad (5)$$

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^{m} p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

$$f_i = 1 - e_i \quad (7)$$

$$w_{si} = f_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} f_i \quad (8)$$

（3）综合权重

评价指标权重对评价结果有较大影响，为尽可能准确、客观确定各评价指标的权重，采用CRITIC法和熵权法权重的加权平均值作为本研究评价指标的综合权重w_i。

$$w_i = \left(w_{ci} + w_{si}\right) \big/ 2 \quad (9)$$

（4）TOPSIS模型

TOPSIS模型法又称为优劣解距离法，近年来广泛应用于水资源评价。通过计算评价对象与最优、最劣方案的距离，进而计算评价对象与最优方案的相对接近度，并据此作为评价方案优劣的依据。相对接近度越接近1，说明评价方案越接近最优方案，该评价方案越优[19]，具体计算过程如下。

计算规范化矩阵S：

$$S = \left(s_{ij}\right)_{m \times n},\ \ s_{ij} = w_i d_{ij} \quad (10)$$

计算评价对象的正、负理想解s_i^+、s_i^-和正、负理想解距离d_j^+和d_j^-：

$$s_i^+ = \max\left\{s_{ij}\right\},\ \ s_i^- = \min\left\{s_{ij}\right\} \quad (11)$$

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(s_{ij} - s_i^+\right)^2},\ \ d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(s_{ij} - s_i^-\right)^2} \quad (12)$$

计算评价方案相对接近度C_j：

$$C_j = d_j^- \big/ (d_j^+ + d_j^-) \quad (13)$$

根据相关研究成果[20]，依据相对接近度C值，将水资源承载能力划分为水资源匮乏、短缺、合理、协调、充裕5个等级（表2）。

表2　水资源承载能力评价分级

Tab. 2　Classification standard of water resources carrying capacity

等级	匮乏	短缺	合理	协调	充裕
综合评价指数	[0,0.3)	[0.3,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,1)

（5）耦合协调度模型

耦合协调度模型用来分析事物内部的协调发展程度[21]，本研究采用耦合协调度模型分析水资源承载力评价中水资源、社会、经济、生态4个子系统协调发展水平。具体计算过程如下：

计算耦合度U：

$$U=4\times\left[C_1\times C_2\times C_3\times C_4\Big/\left(C_1+C_2+C_3+C_4\right)^4\right]^{\frac{1}{4}} \tag{14}$$

式中：C_1、C_2、C_3、C_4 分别表示水资源、社会、经济、生态4个子系统的水资源承载能力综合评价指数。

计算协调度 T 值：

$$T=\alpha_1C_1+\alpha_2C_2+\alpha_3C_3+\alpha_4C_4 \tag{15}$$

式中：α_1、α_2、α_3、α_4 分别表示水资源、社会、经济、生态4个子系统综合权重。

计算耦合协调度 D 值：

$$D=\sqrt{U\times T} \tag{16}$$

耦合协调度介于0~1之间，根据相关研究成果[22]，以0.1为进率，将耦合协调程度由低到高划分为10个等级：极度失调[0, 0.1)、严重失调[0.1, 0.2)、中度失调[0.2, 0.3)、轻度失调[0.3, 0.4)、濒临失调[0.4, 0.5)、勉强失调[0.5, 0.6)、初级协调[0.6, 0.7)、中级协调[0.7, 0.8)、良好协调[0.8, 0.9)、优质协调[0.9, 1]。

（6）障碍度函数模型

障碍度函数模型主要用来分析影响评价结果的主要障碍因子，评价指标的障碍度越大，说明该评价指标对评价结果的影响越大[23]。障碍度计算公式如下：

$$P_{ij}=w_i(1-d_{ij})\Big/\sum_{i=1}^{n}w_i(1-d_{ij}) \tag{17}$$

式中：P_{ij} 表示第 i 个评价指标第 j 年的障碍度。

2 结果与分析

2.1 水资源承载能力子系统评价

2011—2022年甘肃省内陆河流域5市水资源子系统相对接近度的均值呈波动变化趋势（图2a），与2011—2022年区域内降雨年际间变化一致；社会子系统相对接近度的均值基本稳定，与流域内人口密度、耕地率、耕地灌溉率的相对稳定有关；经济子系统、生态子系统相对接近度的均值基本呈上升趋势，说明随着流域经济社会的快速发展、水资源利用效率的提高以及生态用水比重的持续加大，经济子系统、生态子系统持续向着健康方向发展。从市际间分析，2011—2022年酒泉、嘉峪关水资源子系统相对接近度呈现波动下降，张掖、金昌和武威表现为波动上升；除嘉峪关外，其余4市社会子系统相对接近度基本处于稳定状态，经济子系统相对接近度均处于波动上升趋势；生态子系统相对接近度5市均呈现波动上升趋势（图2b~图2f），2019年后，不论从市际间来看，还是从5市均值来看，经济子系统、生态子系统表征的水资源承载能力等级均高于水资源子系统、社会子系统。未来，提高水资源子系统、社会子系统的水资源承载能力水平是提升甘肃省内陆河流域水资源综合承载能力的关键所在，可通过外流域调水、加强节水型社会建设等措施提

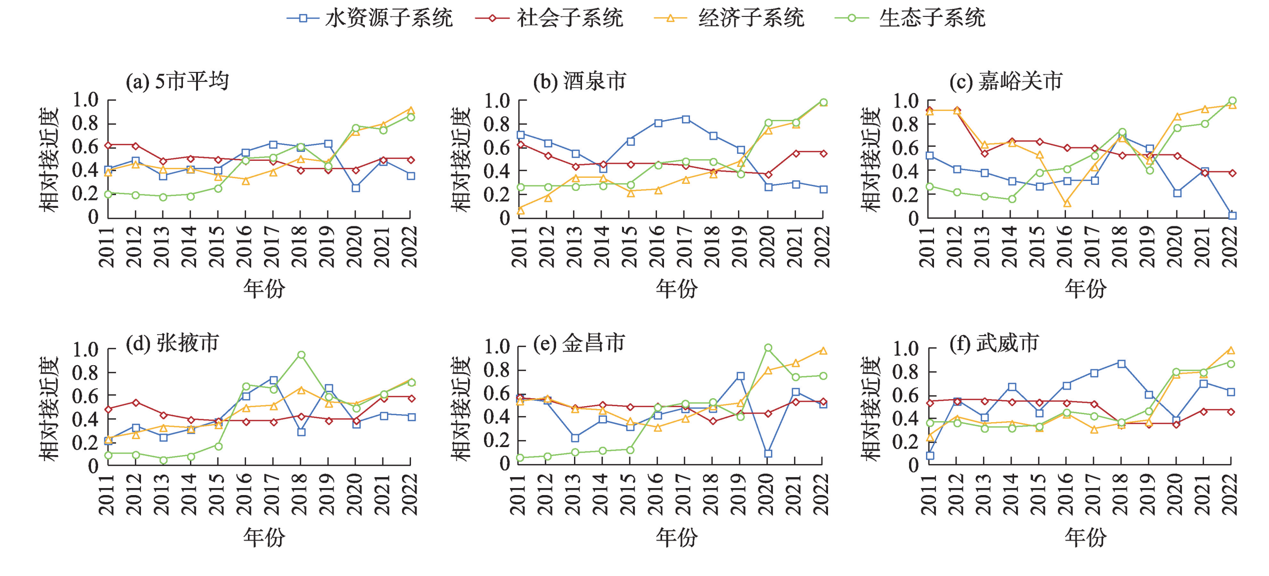


图2 甘肃省内陆河流域水资源承载能力子系统变化趋势

Fig. 2 The change tend of sub-system of water resources carrying capacity of inland river basin in Gansu Province

升水资源承载能力。

2.2 水资源承载能力综合评价

由表3可见,2011—2022年甘肃省内陆河流域水资源承载能力总体呈缓慢增加趋势,5市相对接近度的均值由2011年的0.352增加至2022年的0.480,增加了约36%,平均每年增加约3%,水资源承载能力等级由2011年的短缺状态转换为2022年的合理状态。从时间上分析,酒泉、张掖两市相对接近度分别由2011年的0.357、0.219增加至2022年的0.494、0.482,水资源承载能力等级分别由2011年的短缺、匮乏状态转换为2022年的合理状态;金昌、武威两市相对接近度分别由2011年的0.364、0.311增加至2022年的0.522、0.515,水资源承载能力等级均由2011年的短缺状态转换为2022年的协调状态;嘉峪关市相对接近度呈波动变化趋势,这可能与嘉峪关市为工业城市、人口规模小、农业用水占比低有关。从市际间分析,2011年5市相对接近度由高到低分别是嘉峪关(0.508)、金昌(0.364)、酒泉(0.357)、武威(0.311)、张掖(0.219);2022年5市相对接近度由高到低分别是金昌(0.522)、武威(0.515)、酒泉(0.494)、张掖(0.482)、嘉峪关(0.385);2011—2022年5市相对接近度的均值由高到低分别是嘉峪关(0.415)、武威(0.403)、酒泉(0.384)、金昌(0.377)、张掖(0.351),酒泉、金昌、张掖水资源承载能力等级处于短缺状态,而由于实施了跨流域生态补水工程,嘉峪关、武威水资源承载能力等级处于合理状态。总体来看,随着甘肃省内陆河流域水利基础设施的不断完善,节水型社会建设的持续推进,各行业节水力度的不断加强,生态用水比重的持续加大,5市水资源承载能力等级呈向好发展趋势。

表3 甘肃省内陆河流域5市相对接近度

Tab. 3 Relatively proximity degree of five cities in inland river basin in Gansu Province

年份	酒泉	嘉峪关	张掖	金昌	武威	均值
2011	0.357	0.508	0.219	0.364	0.311	0.352
2012	0.333	0.467	0.266	0.360	0.407	0.367
2013	0.315	0.349	0.216	0.268	0.361	0.302
2014	0.281	0.360	0.220	0.300	0.409	0.314
2015	0.332	0.372	0.251	0.268	0.368	0.318
2016	0.425	0.332	0.437	0.341	0.444	0.396
2017	0.440	0.384	0.477	0.377	0.430	0.422
2018	0.400	0.543	0.408	0.350	0.361	0.412
2019	0.363	0.414	0.441	0.419	0.347	0.397
2020	0.399	0.431	0.335	0.432	0.384	0.396
2021	0.463	0.429	0.461	0.528	0.503	0.477
2022	0.494	0.385	0.482	0.522	0.515	0.480
均值	0.384	0.415	0.351	0.377	0.403	0.386

2.3 子系统耦合协调性

由图3a可见,甘肃省内陆河流域5市水资源承载能力评价中水资源、社会、经济、生态4个子系统耦合协调性呈稳定上升趋势,耦合协调度的均值由2011年的0.586增加至2022年的0.762,增加了约30%,平均每年提高约2.5%,耦合协调性等级由2011年的勉强失调转换为2022年的中级协调。自2014年起,5市水资源承载能力4个子系统间耦合协调性等级均从失调状态转换为协调状态。由图3b~图3f可知,甘肃省内陆河流域5市中,酒泉和武威,嘉峪关,张掖和金昌分别于2012年、2011年和2016年起,4个子系统间耦合协调性等级从失调状态到转换为协调状态。从市际间分析,5市水资源承载能力子系统间耦合协调度均值由高到低依次为武威市(0.696)、嘉峪关市(0.686)、酒泉市(0.675)、金昌市(0.642)、张掖市(0.639),均处于初级协调阶段。以上结果显示,甘肃省内陆河流域5市水资源承载能力子系统耦合协调性均处于较好水平,持续向良好协调、健康状态发展。

2.4 评价指标障碍度

为分析影响甘肃省内陆河流域水资源承载能力等级的主要障碍因素,利用障碍度函数模型分别计算了5市2011—2022年13个评价指标的障碍度,取各年度评价指标障碍度均值作为分析的依据。由表4中可以发现,5市障碍度排名前5位的评价指标中,耕地率指标出现5次,生态用水占比、人口密度、废水中化学需氧量排放量指标出现4次,产水模数、供水模数指标出现2次,农业用水占比、人均水资源量、水资源开发利用率、耕地灌溉率指标出现1次。以上结果显示,耕地率、生态用水占比、人口密度和废水中化学需氧量排放量指标是影响甘肃省内陆河流域水资源承载能力的主要障碍指标。

为进一步分析耕地率、生态用水占比、人口密度和废水中化学需氧量排放量指标对甘肃省内陆河流域5市水资源承载能力的影响趋势,分别绘制障碍度趋势图。由图4可知,2011—2022年耕地率指标障碍度总体呈上升趋势,生态用水占比、废水中化学需氧量排放量指标障碍度总体呈下降趋势,

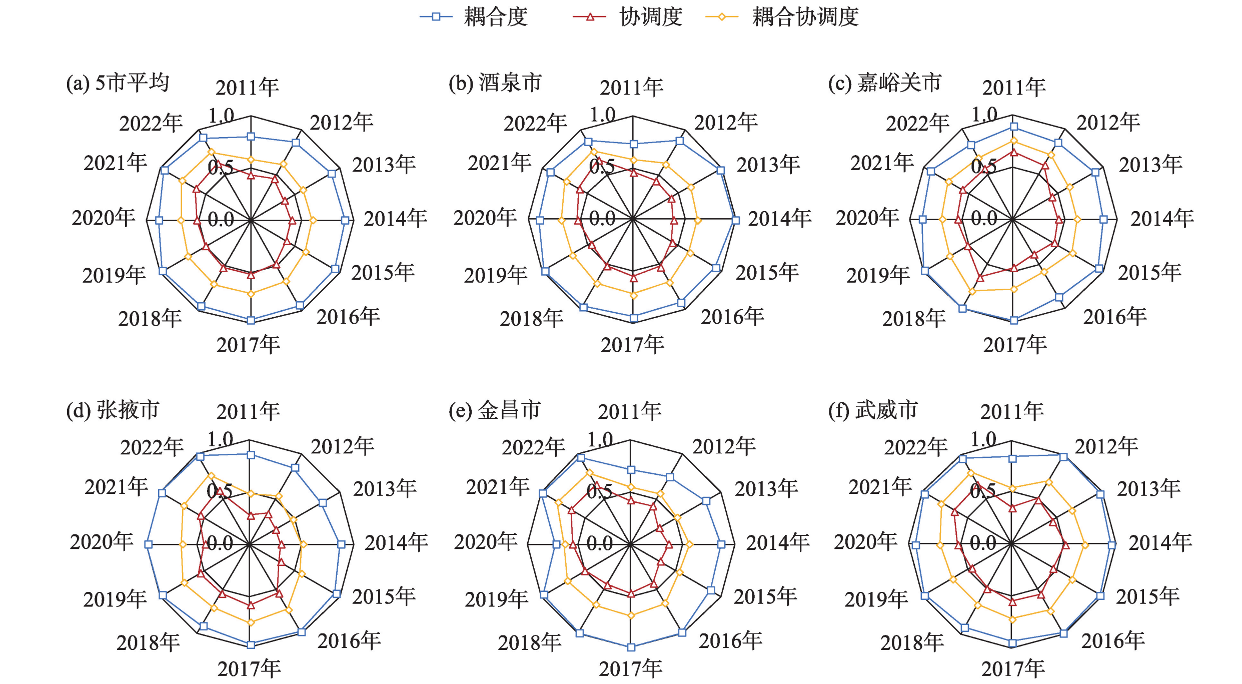


图3 甘肃省内陆河流域水资源承载能力耦合协调性

Fig. 3 Coupling and coordination of water resources carrying capacity of inland river basin in Gansu Province

表4 甘肃省内陆河流域水资源承载能力指标障碍度

Tab. 4 Obstacle degrees of water resources carrying capacity of inland river basin in Gansu Province

指标层	酒泉市	嘉峪关市	张掖市	金昌市	武威市
人均水资源量	0.077	0.093	0.064	0.065	0.037
产水模数	0.086	0.164	0.096	0.064	0.048
供水模数	0.038	0.094	0.081	0.092	0.070
水资源开发利用率	0.064	0.054	0.095	0.031	0.043
人口密度	0.116	0.046	0.140	0.162	0.120
耕地率	0.106	0.140	0.087	0.138	0.210
耕地灌溉率	0.048	0.056	0.076	0.035	0.112
农业用水占比	0.121	0.064	0.053	0.024	0.061
万元工业增加值用水量	0.046	0.016	0.076	0.052	0.084
万元GDP用水量	0.047	0.022	0.033	0.065	0.020
生态用水占比	0.150	0.081	0.082	0.132	0.099
废水中化学需氧量排放量	0.087	0.099	0.047	0.083	0.086
废水中氨氮排放量	0.013	0.071	0.071	0.058	0.010

酒泉、张掖、金昌、武威4市人口密度指标障碍度总体呈下降趋势，嘉峪关市人口密度指标障碍度总体呈上升趋势。结果显示，耕地率仍是未来影响甘肃省内陆河流域水资源承载能力的关键因素，生态用水占地、人口密度、废水中化学需氧量排放量会在一定时期内继续影响该流域水资源承载能力，但未必是关键因素。未来，可通过进一步推广现代灌溉技术、实行作物轮作制度等措施提升水资源承载能力。

3 讨 论

本研究对甘肃省内陆河流域进行水资源承载能力评价和子系统间耦合协调度分析发现，甘肃省内陆河流域5市水资源承载能力呈持续向好发展趋势，水资源承载水平总体评价由短缺状态转换为合

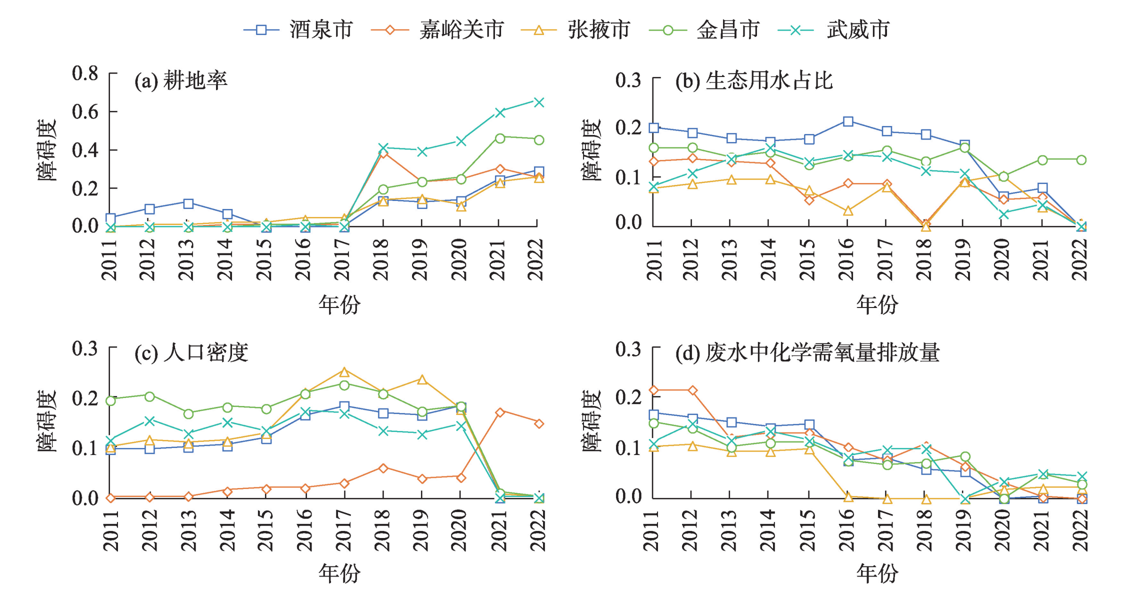


图4　甘肃省内陆河流域水资源承载能力障碍度趋势

Fig. 4　Obstacle degree tend of water resources carrying capacity of inland river basin in Gansu Province

理状态,这与王金星等[3]得出甘肃省水资源承载力变化趋势向好研究结果一致。近年来"一带一路""脱贫攻坚"等国家政策的实施,加速了甘肃省内陆河流域5市的水利设施建设,特别是大力实施高标准农田建设、灌区续建配套与节水改造等,提高了社会经济发展过程中资源利用率和回收率[24]。因此,水资源承载力呈现上升趋势。经济子系统和生态子系统水资源承载能力水平高于水资源子系统和社会子系统。这与吴明艳等[25]对西北五省的水资源承载能力的研究结果基本一致,说明水资源子系统和社会子系统水资源承载能力提升潜力较大,在未来应重点关注。水资源承载能力子系统耦合协调分析结果显示,水资源、社会、经济、生态4个子系统耦合协调性呈稳步提升趋势,耦合协调性由勉强失调提升为中级协调,说明甘肃省内陆河流域水资源承载水平向均衡、协调、健康、可持续方向发展。障碍度模型分析结果显示,耕地率、生态用水占比、人口密度、废水中化学需氧量排放量等4项指标是影响甘肃省内陆河流域水资源承载能力的主要障碍指标,未来可通过控制耕地面积、增加生态用水等措施提升水资源承载能力。本研究也存在一些局限性,在水资源承载能力评价指标体系构建上,后续可进一步增加指标层数量,提高指标的代表性。

4　结 论

基于"水资源-社会-经济-生态"评价指标体系,利用CRITIC法和熵权法确定评价指标的权重,通过TOPSIS模型开展甘肃省内陆河流域5市水资源承载能力评价。同时,分别利用耦合协调度模型和障碍度函数模型,量化了各子系统间的耦合协调性以及各评价指标的障碍度,得出以下主要结论:

(1) 甘肃省内陆河流域水资源承载能力等级总体呈缓慢增加趋势,2011—2022年水资源承载能力相对接近度提高了36.36%,由水资源短缺状态转换至合理状态。同时,经济子系统、生态子系统表征的水资源承载能力等级均高于水资源子系统、社会子系统。

(2) 甘肃省内陆河流域5市水资源、社会、经济、生态4个子系统间耦合协调性呈稳步向好趋势,2011—2022年耦合协调度增加了30.03%,由勉强失调提升为中级协调。

(3) 耕地率、生态用水占比、人口密度、废水中化学需氧量排放量指标是影响甘肃省内陆河流域水资源承载能力的主要障碍指标,其中耕地率指标障碍度逐年呈上升趋势,是关键障碍指标。

(4) 甘肃省内陆河流域水资源总量不足,应严格执行"以水定城、以水定地、以水定人、以水定产"

政策,同时要促进水的高效利用。

参考文献(References):

[1] 左其亭, 张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 387−395. [Zuo Qiting, Zhang Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 387−395.]

[2] 黄楚珩, 蒋志云, 杨志广, 等. 基于熵值法和层次分析法的广东省水资源安全评价及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 140−147. [Huang Chuheng, Jiang Zhiyun, Yang Zhiguang, et al. Evaluation and factors of water resource security of Guangdong Province using entropy value and analytic hierarchy process methods[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(5): 140−147.]

[3] 王金星, 杨银科, 盛强. 基于改进TOPSIS模型的甘肃省水资源承载力评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 35−39. [Wang Jinxing, Yang Yinke, Sheng Qiang. Evaluation of water resources carrying capacity in Gansu Province based on improved TOPSIS model[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(11): 35−39.]

[4] Chartzoulakis K, Bertaki M. Sustainable water management in agriculture under climate change[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015, 4(4): 88−98.

[5] Tortajada C, González-Gómez F, Biswas A K, et al. Water demand management strategies for water-scarce cities: The case of Spain [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45(2): 649−656.

[6] Widodo B, Lupyanto R, Sulistiono B, et al. Analysis of environmental carrying capacity for the development of sustainable settlement in Yogyakarta urban area[J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 28(8): 519−527.

[7] 姜锋, 张百祖. 基于层次分析法和变异系数法的酒泉市水资源承载能力分析评价研究[J]. 节水灌溉, 2023, 46(9): 94−99. [Jiang Feng, Zhang Baizu. Analysis and evaluation of water resources carrying capacity in Jiuquan based on AHP and variation coefficient method[J]. Water Saving Irrigation, 2023, 46(9): 94−99.]

[8] 李龙, 蒋天乐, 李磊, 等. 基于模糊综合评价及TOPSIS模型的武威市水资源承载力评价及预测[J]. 水利规划与设计, 2023, 36(1): 69−74, 107, 122. [Li Long, Jiang Tianle, Li Lei, et al. Evaluation and prediction of Wuwei's water resources carrying capacity based on fuzzy comprehensive evaluation and Topsis mode[J]. Water Resources Planning and Design, 2023, 36(1): 69−74, 107, 122.]

[9] 黄博, 李博文, 雷正烨, 等. 基于TOPSIS模型及综合权重的武威市水资源承载力和水安全评价[J]. 水利规划与设计, 2023, 36(2): 56−63. [Huang Bo, Li Bowen, Lei Zhengye, et al. Assessment of Wuwei's water carrying capacity and water security based on TOPSIS model and comprehensive weights[J]. Water Resources Planning and Design, 2023, 36(2): 56−63.]

[10] 谭豪, 脱云飞, 王倩, 等. 基于CRITIC-VIKOR法的云南省水资源承载力综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(4): 118−126. [Tan Hao, Tuo Yunfei, Wang Qian, et al. Comprehensive evaluation of water carrying capacity of Yunnan Province based on CRITIC-VIKOR method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023, 34(4): 118−126.]

[11] 刘庆芳, 王小坤, 朱青, 等. 基于"三生"功能的西藏自治区水资源承载力系统耦合关系[J]. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1618−1631. [Liu Qingfang, Wang Xiaokun, Zhu Qing, et al. Coupling relationship of water resources carrying capacity system in Xizang Autonomous Region based on "production-living-ecological" function[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6): 1618−1631.]

[12] 唐家凯, 丁文广, 李玮丽, 等. 黄河流域水资源承载力评价及障碍因素研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(7): 73−77. [Tang Jiakai, Ding Wenguang, Li Weili, et al. Study on evaluation of water resources carrying capacity and obstacle factors in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2021, 43(7): 73−77.]

[13] 雷加强, 高鑫, 赵永成, 等. 河西走廊-塔克拉玛干沙漠边缘阻击战: 风沙形势与防治任务[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 966−977. [Lei Jiaqiang, Gao Xin, Zhao Yongcheng, et al. The battle on the edge of Hexi Corridor-Taklimakan Desert: Wind-blown sand situation and prevention tasks of desertification control[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7): 966−977.]

[14] 赵豫芝, 杨建军. 南疆地区水资源承载力及子系统耦合协调性时空格局[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 213−223. [Zhao Yuzhi, Yang Jianjun. Spatio-temporal pattern of water resource carrying capacity, coupling and coordination of subsystems in southern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 213−223.]

[15] 孙钦珂, 周亮, 唐相龙, 等. 干旱区绿洲城镇扩张对耕地空间影响及预测——以河西走廊区域为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1008−1020. [Sun Qinke, Zhou Liang, Tang Xianglong, et al. Spatial influence and prediction of oasis urban expansion on cultivated land in arid areas: A case study of the Hexi Corridor[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 1008−1020.]

[16] 梁川. 甘肃省河西内陆河流域农业高效节水灌溉现状分析与对策研究[J]. 水利发展研究, 2021, 21(8): 84−87. [Liang Chuan. Current situation analysis and countermeasure research of agricultural efficient water-saving irrigation in Hexi Inland River basin of Gansu Province[J]. Water Resources Development Research, 2021, 21(8): 84−87.]

[17] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763−770.

[18] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552−556. [Zou Zhihong, Sun Jingnan, Ren Guangping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 552−556.]

[19] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于AHP-TOPSIS模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20−25. [Li Shaopeng, Zhao Heng, Wang Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20−25.]

[20] 田培, 张志好, 许新宜, 等. 基于变权TOPSIS模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),

2019, 53(5): 755-764. [Tian Pei, Zhao Zhihao, Xu Xinyi, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on variable weight TOPSIS model[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2019, 53(5): 755-764.]

[21] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响——以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 582-599. [Wang Yong, Sun Ruixin. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 582-599.]

[22] 马勇, 李丽霞, 任洁. 神农架林区旅游经济-交通状况-生态环境协调发展研究[J]. 经济地理, 2017, 37(10): 215-220, 227. [Ma Yong, Li Lixia, Ren Jie. Coordination development research among the tourism economy-traffic condition-ecological environment in Shengnongjia forest district[J]. Economic Geography, 2017, 37(10): 215-220, 227.]

[23] 孙才志, 吴永杰, 刘文新. 基于熵权TOPSIS法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 1-8. [Sun Caizhi, Wu Yongjie, Liu Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 1-8.]

[24] 史紫薇, 冯文文, 钱会. 基于流域尺度的甘肃省水资源承载力评价[J]. 生态科学, 2021, 40(3): 51-57. [Shi Ziwei, Feng Wenwen, Qian Hui. Evaluation of water resources carrying capacity in Gansu Province based on watershed[J]. Ecological Science, 2021, 40(3): 51-57.]

[25] 吴明艳, 曾晓春, 刘兴德, 等. 基于熵权TOPSIS模型的西北五省区水资源承载力评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2022, 64(12): 78-85, 92. [Wu Mingyan, Zeng Xiaochun, Liu Xingde, et al. Research on the evaluation of water resources carrying capacity in Five Northwest Provinces based on entropy TOPSIS model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, 64(12): 78-85, 92.]

Carrying capacity of the water resources of the inland river basin in the Gansu Province

LI Changliang[1], LUO Tianfeng[1], KANG Yanxia[2]

(1. Construction Cost and Fee Management Center of Water Conservancy Projects, The Water Resources Department of Gansu Province, Lanzhou 730030, Gansu, China; 2. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: As an important passage of the Silk Road, the water resources carrying capacity of the inland river basin is a key factor impacting the sustainable development of society and economy in the Gansu Province. Therefore, by constructing an evaluation index system of “water resources-society-economy-ecology,” based on the CRITIC and the entropy methods for calculating the comprehensive weight of the evaluation index, this study evaluated the carrying capacity of the water resources of the region. The study involved analyzing the coupling and coordination situation of each subsystem and the main obstacle factors affecting the capacity by using the TOPSIS model, the coupling and coordination function model, and the obstacle factors function model, respectively. The results suggested that the water resources and social subsystem development of the water resources capacity in Jiuquan, Jiayuguan, Zhangye, Jinchang, and Wuwei lagged behind the economic and ecological subsystem development of the region from 2011 to 2022. The water resource carrying capacity of the inland river basin was generally in a slow upward trend in the Gansu Province, thus escalating its shortage state to a reasonable level progressively. Additionally, relative to the average relative proximity degree, the water carrying capacity of Jiuquan, Jinchang, and Zhangye is at a shortage level, whereas the water carrying capacity of Jiayuguan and Wuwei is at a reasonable level. The level of coupling coordination of the four subsystems in the five cities was at its primary coordination stage. The key to improving the water resource carrying capacity of the inland river basin in the Gansu Province is to improve the carrying capacity of water resources and social subsystems. The main obstacles to improving the carrying capacity of water resources are the rate of cultivated land, proportion of ecological water use, population density, and Chemical Oxygen Demand (COD) from wastewater.

Keywords: water resources carrying capacity; TOPSIS; coupling and coordination; obstacle degree; Gansu